

CAD/CAMセラミックアンレー修復の接着：象牙質レジンコーティングとセメント接着時のボンディング材事前塗布の効果

著者	前野 雅彦
学位名	博士(歯学)
学位授与機関	日本歯科大学
学位授与年度	2013
学位授与番号	32667甲第1075号
URL	http://id.nii.ac.jp/1102/00000700/

CAD/CAM セラミックアンレー修復の接着

象牙質レジンコーティングと
セメント接着時のボンディング材事前塗布の効果

前 野 雅 彦

Adhesion of CAD/CAM Ceramic Onlay Restoration

**Effect of Immediate Dentin Sealing
and Additional Application of Bonding Agent prior to Resin Cement Luting**

Masahiko MAENO

日本歯科大学 大学院生命歯学研究科 歯科臨床系専攻（指導：勝 海 一 郎 教授）
研究指導：奈 良 陽一郎 教授
（日本歯科大学 生命歯学部 接着歯科学講座）

The Nippon Dental University, Graduate School of Life Dentistry at Tokyo
(Director : Prof. Ichiroh KATSUUMI)
Conducted by Prof. Yoichiro NARA
The Nippon Dental University, School of Life Dentistry at Tokyo
Department of Adhesive Dentistry

(2014 年 1 月)

和文表題 [CAD/CAM セラミックアンレー修復の接着

象牙質レジンコーティングとセメント接着時のボンディング材事前塗布の効果]

和文著者氏名 [前野雅彦]

英文表題 [Adhesion of CAD/CAM Ceramic Onlay Restoration

Effect of Immediate Dentin Sealing and Additional Application of Bonding Agent prior to Resin Cement Luting]

英文著者氏名 [Masahiko MAENO]

本文

緒 言

近年、目覚ましい技術の進歩により、Digital Dentistry を歯科の臨床において応用することが可能となっている。その代表格にある CAD/CAM の活用によって作製された修復物は、従来法による作業模型上で作製した間接法修復物に劣らない精度を具備するに至っている¹⁾。また、作業過程のデータ化や省略化は、印象材の変形はじめ模型の破損などといったテクニカルエラーの回避や、修復物形状の微細な修正、時間的・材料的節約を図れることから、患者・術者双方にとって望ましい特性をもっている。

特に、チェアサイド型歯科用 CAD/CAM システムは、次世代の歯科医療を担う首座的機器といえる。本システムは、従来法による通常の間接修復法において不可欠な印象採得・作業模型作製・修復物製作・接着といった一連の治療と技工作業を、一回の来院、かつチェアサイドで実施することを可能としている。また、予後に大きな影響を与える修復としての接着において、複数回来院法では回避できない仮封材による接着面への影響や仮封期間中に生じる窩縁部のダメージなどによる問題²⁾を排除できる。

一方、臨床の場における歯冠修復に際しては、審美的かつ低侵襲性の治療を受けたいという患者側の願いを叶えるため、症例が許す限りは、コンポジットレジンによる直接修復が選択される場合が多い。しかし、機能咬頭や隣接面などを含む広範な修復が必要とされる症例では、直接法の選択によって手技的難度が高くなるため、間接修復法を選択することによって良好な予後を期待することになる³⁾。

また、間接修復法による歯冠色材料の使用は、非歯冠色材料では叶えられない審美性の獲得に寄与し、また同時に優れた生体親和性によって、金属アレルギーなどの問題も回避可能⁴⁾となる利点を有している。

一方、歯冠色材料の大多数は脆性材料であるため、修復に際しては、飛躍的な進歩をみせる接着性レジンセメントを含めたレジン系材料の活用による歯質との接着一体化が必須となる。さらに、レジンセメントと歯質との接着性増進、窩洞内象牙質の保護による術後疼痛の抑制、修復物と窩洞の適合性の向上などに寄与する象牙質面へのレジンコーティ

ング法⁵⁾を含めた適切な被着面処理は、確実かつ高品位な修復の具現化に寄与する。しかし、チェアサイド型歯科用 CAD/CAM システムを用いた歯冠色材料利用の間接修復における象牙質レジンコーティングの有効性や接着への影響に関しては、いまだ不明な点が多く、その説明が求められる。

そこで本研究では、CAD/CAM セラミックアンレー修復の接着について明らかにすることを目的に、実験 1 では、窩洞内象牙質面に対する象牙質レジンコーティングの効果と動的荷重による影響について、実験 2 では、実験 1 で得られた接着最弱部に対する改善処置としてのセメント接着時ボンディング材事前塗布の効果について、micro-tensile bond test による髄側壁象牙質面への引張接着強さ（以後、 μ -TBS）を測定し、ワイブル分析による接着信頼性と接着耐久性の評価を含め検討した。

加えて、口腔内には多様なストレス因子が存在し、特に咀嚼による動的荷重が被修復歯の接着に大きな影響を与えていることは容易に推察できる。

以上から、CAD/CAM システムによる修復の未知なる部分について、咀嚼環境想定条件を実験室内 in vitro 環境下で再現し、客観的な評価検討を加えることは、臨床的予後の推測を行う上で重要な科学的根拠となりうる。

さらに、方略となる接着評価の代表的指標としての、接着強さ測定に際しては、micro-tensile bond test⁶⁾ が国内外で採用されている。この方法は、測定目標とする被着面に限局した試料を調整することによって、修復過程ならびに修復後の臨床的ストレス因子が作用して生じる不顕性挙動を、接着強さの観点から抽出し、検討することができる。

材料と方法

1. 実験材料

Table 1 に、実験に用いた材料を示す。

すなわち、実験 1 における修復物作製に際しては、チェアサイド型歯科用 CAD/CAM システム CEREC (CEREC AC および MC XL、SIRONA Dental Systems)、歯科光学印象採得補助材料 CEREC Optispray (SIRONA Dental Systems) ならびに歯科切削加工用セラミックスである VITABLOCS Mark II CEREC/inLab (VITA) を用いた。また、象牙質レジンコーティングに際しては、歯面前処理材として、1 ボトル 1 ステップ型オールインワンアドヒーズシステムである Clearfil Bond SE One (Kuraray Noritake Dental) を、コーティング材として、低粘性レジンである Clearfil Protect Liner F (Kuraray Noritake Dental) を用いた。一方、接着に先立つ修復物内面への前処理に際しては、リン酸処理材である K-etchant gel (Kuraray Noritake Dental) とシランカップリング材である Clearfil Ceramic Primer (Kuraray Noritake Dental) を用いた。さらに、窩洞内被着面への前処理に際しては、2 ボトル型セルフエッチングプライマーである ED Primer II (Kuraray Noritake Dental) を用いた。

加えて、実験 2 において、接着性増進を図る追加処理材として、シランカップリング後の処理面とセメントとの一体化促進を期待し、2 ボトル 1 ステップ型デュアルキュアタイプアドヒーズシステムである Clearfil DC Bond (Kuraray Noritake Dental) を用いた。

また、両実験を通じての接着に際しては、自己接着能のないデュアルキュア型接着性レジ

ンセメントである Clearfil Esthetic Cement (Kuraray Noritake Dental) を用いた。さらに、光照射に際しては、平均照射強度: 700 mW/cm^2 を供出する 13 / 8mm ターボチップを装着した可視光線照射器 (Optilux501, sds Kerr, USA) を使用した。

一方、被験歯には暗所 23℃実験室保管の 0.1%チモール水溶液中に保存したヒト抜去健全上顎第一大臼歯の中から実験 1 には 40 本、実験 2 には 10 本を選択し使用した。なお、ヒト抜去歯の使用に関しては、日本歯科大学生命歯学部臨床研究倫理委員会の承認 (NDU-T2012-26) を得て行った。

2. 実験手順

1) 実験 1: 象牙質レジンコーティングおよび動的荷重の有無が CAD/CAM セラミックアンレー修復の接着に及ぼす影響

(1) 被験歯の規格化植立と咬合面形態再現用光学印象

Fig. 1 に、被験歯であるヒト抜去健全上顎第一大臼歯のモールドへの規格化植立についての模式図を示す。

まず、植立に先立ち、被験歯の歯根分岐部から歯髓腔の開窓を行った後に、010 ラウンドスチールバー装着のマイクロモーターによって歯髓組織の除去と歯髓腔内面の新鮮面露出を無注水下の低速切削によって行った。

ついで、Clearfil Bond SE One と Clearfil AP-X (Kuraray Noritake Dental) によって、歯髓腔内の接着充填処理を行った。その後、規格化抜去歯植立用器具を用いて、被験歯の近心頬側・口蓋側咬頭頂と遠心頬側咬頭頂とによって決定される平面が規格化植立用円筒モールド底面と平行になるよう、常温重合レジン (Adfa, 松風) を用いて被験歯を植立した。ついで、修復物作製に際し、咬合面の形態を再現する CEREC のバイオジェネリックコピー機能による光学印象を行うために、規格化植立した窩洞未形成の被験歯に対する CEREC Optispray の均一噴霧を経て、製造者指定の操作マニュアルを遵守した採得を行った。

(2) 規格化 MODP 窩洞の形成

Fig. 2 に、本実験に用いた複製窩洞形成器を示す。この形成器は、最小単位 $50\mu\text{m}$ のマイクロメーターを応用することによって、垂直的窩洞深さの規定が可能であり、さらに複製基準となるマスター窩洞試料の装着によって、倣い加工応用の切削駆動メカニズムによる任意のコピー窩洞の形成が可能となる機能を有している。

規格化窩洞の形成に先立ち、被験歯は象牙質レジンコーティング群 (以後、C+群) 20 試料と、非象牙質レジンコーティング群 (以後、C-群) 20 試料に分別した。その後、C+群にはフラットエンドダイヤモンドポイント FG103 (松風) を、C-群にはラウンドエンドダイヤモンドポイント FG107RD (松風) を装着した複製窩洞形成器を用いて、空冷環境下による規格化窩洞の形成を行った。

Fig. 3 に、本実験に用いた規格化 MODP 窩洞の形成に際しての模式図を示す。

まず、被験歯の中心窩最深部から 2.0mm の深さに髓側壁を定め、かつ頬側方向に 2.0 mm

移動させた位置における近遠心的切削によって頬側壁を形成し、その後、深さ 2.0 mm を保ちながら口蓋側近遠心部の咬頭隆線を切削することによって、L 字状窩洞とした。

ついで、近心隣接面から遠心隣接面にわたり、C-群では軸面高さ 2.0 mm、歯肉側壁平行部幅 0.75 mm のラウンデッドショルダー形成を、C+群では軸面高さ 2.0 mm、1.00mm のショルダー形成を行った。その後、抵抗形態として髄側軸側線角に面取り整理を行うことによって規格化 MODP 窩洞とした。

(3) 象牙質レジンコーティング

C+群の規格化 MODP 窩洞内の露出象牙質面に対し、製品指定の方法で Clearfil Bond SE One による歯面処理、Clearfil Protect Liner F の塗布、光照射を行い、象牙質レジンコーティングとした。なお、Clearfil Protect Liner F に際しては、事前実験により 0.008g が必要十分量であると確認した上で、窩壁に塗布した後に、小筆を用いて厚さの一定化を図った。また、光照射後には、消毒用 70%アルコールで表層の未重合層を清拭除去した。

(4) 光学印象採得と修復物の作製

修復用セラミックアンレーの作製に際しては、製造者指定の操作マニュアルに従って実施した。具体的には、規格化窩洞試料に対して CEREC Optispray を均一に噴霧し、CEREC を用いて咬合面・近遠心・頬口蓋側の 5 方向から光学印象採得を行った。ついで、事前に採得しておいた咬合面形態再現用光学印象とバイोजェネリックコピー機能を併用して修復物の設計、ミリングを行い、MODP セラミックアンレーを作製した。

(5) 修復物の接着

作製したすべての修復物内面は K-etchant gel による清掃処理を行い、Clearfil Ceramic Primer によるシランカップリング処理を行った。一方、C-群の窩洞内被着面には ED Primer II による前処理を行い、C+群の窩洞内象牙質レジンコーティング部には Clearfil Ceramic Primer による、エナメル質切削面には ED Primer II による前処理を行った。

ついで、Clearfil Esthetic Cement の修復物内面への塗布、窩洞への圧接、余剰セメント除去、咬合面・近心面・遠心面・口蓋側面からの各 20 秒間光照射、溢出物の除去、研磨を経て、37℃湿度 100%ボックス中に 1 時間保管することによって、40 個の修復試料とした。

(6) 動的荷重の負荷

Table 2 に、本実験で用いた複合機能試験機^{7,8)} (以後、MFA) の機能、条件設定可能範囲、および本実験における動的荷重負荷条件を示す。

修復試料は、C+群と C-群それぞれの条件試料半数 10 試料に対して、MFA による 157N を毎分 90 回のストロークで 30 万回の動的荷重を 37±1℃の水中下にて負荷する動的荷重負荷群 (以後、C+S+群および C-S+群) と、残り半数の各 10 試料による非動的荷重負荷群 (以後、C+S-群および C-S-群) を設定した。

なお、動的荷重は、被験修復歯が上顎大臼歯であるため、機能咬頭である口蓋側咬頭の内

斜面と外斜面に負荷されるよう、常温重合レジン Adfa（松風）によって対合体を調整し用いた。

(7) 規格化 μ -TBS 値測定のための試料切断

Fig. 4 に、 μ -TBS 値測定のために行った試料切断手順を示す。

まず、中心窩を含む咬合面中央部の修復物表面に対し K-etchant gel を用いた清掃処理、Clearfil Ceramic Primer と Clearfil Bond SE One 併用による表面処理を行い、 μ -TBS 値測定のための Clearfil AP-X 追加築盛を行った。その後、硬組織ミクロトーム（Leitz 1600 Saw Microtome, Ernst Leitz Wetzlar, Germany）を用いて、中心窩が中央に位置するよう、歯軸に平行かつ頬側壁窩縁に直行する面によって 3 回の縦切断を行った後、同様に中心窩を中央に位置付け、歯軸および頬側壁窩縁に平行な面によって 3 回の近遠心的切断を行い、1 修復試料から、縦 1.0mm、横 1.0mm のビーム状試料 4 本を得た。

(8) μ -TBS 値の測定

Fig. 5 に、 μ -TBS 値測定のためのビーム状試料の模式図を、**Fig. 6** に、本実験における μ -TBS 値測定方法を示す。

1.0mm² の髄側壁接合界面を有するビーム状試料に対する μ -TBS 値測定に際しては、大下ら⁹⁾の方法に準じて、規格化 μ -TBS 値測定用試料固定治具を設置させた万能試験機（Autograph AG-1, 島津）に、ビーム状試料を接着装填後、クロスヘッドスピード 1.0mm/min の条件下にて実施（各条件 n=40）した。

(9) μ -TBS 値測定後の破断面様相の観察

μ -TBS 値測定後の全ビーム状試料破断面について、光学顕微鏡（Measurescope MM-1200, Nikon）を用いて 200 倍下における観察を行った。その後、代表的な試料に対し、蒸着装置（Ion sputter E-1030, 日立）を用いて Os 蒸着を行い、走査電子顕微鏡（S-4000, 日立、以後、SEM）を用いて加速電圧 5kv で、倍率 60 倍ならびに 600 倍の破断面様相の観察を行った。

2) 実験 2：ボンディング材事前塗布の有無が CAD/CAM セラミックアンレー修復の接着に及ぼす影響

被験歯であるヒト抜去健全上顎第一大臼歯 10 本に対して、実験 1 の C+条件と同様の手順によって、規格化植立と咬合面形態再現用光学印象採得、規格化 MODP 窩洞の形成、象牙質レジンコーティング、光学印象採得、設計、ミリングを経て、MODP セラミックアンレーを作製した。

修復物の接着に際しては、修復物内面に K-etchant gel による清掃処理を行い、Clearfil Ceramic Primer によるシランカップリング処理を行った。また、窩洞内象牙質レジンコーティング部には Clearfil Ceramic Primer による、エナメル質切削面には ED Primer II による前

処理を行った。

さらに、修復物内面ならびに窩洞内面に対する Clearfil DC Bond の塗布を行い、強圧のエアで可及的に薄層になるよう調整した。

ついで、Clearfil Esthetic Cement の修復物内面への塗布、窩洞への圧接、余剰セメント除去、咬合面・近心面・遠心面・口蓋側面からの各 20 秒間光照射、溢出物の除去、研磨を経て、37℃湿度 100%ボックス中に 1 時間保管することによって、10 個の修復試料とした。

その後、実験 1 の S+条件と同様に動的荷重の負荷、規格化 μ -TBS 値測定のための試料切断を経て、 μ -TBS 値の測定および測定後の破断面様相の観察を行った。

結 果

1. 実験 1：象牙質レジンコーティングおよび動的荷重の有無が CAD/CAM セラミックアンレー修復の接着に及ぼす影響

1) μ -TBS 値について

(1) 象牙質レジンコーティングおよび動的荷重の有無による影響

Fig. 7 に、象牙質レジンコーティングおよび動的荷重の有無による髄側象牙質窩壁に対する平均 μ -TBS 値 (s.d.) を示す。

二元配置分散分析の結果、象牙質レジンコーティングおよび動的荷重の有無は、 μ -TBS 値に対し危険率 1%で高度に有意な影響を与え、また、両因子による交互作用効果が認められた。

t 検定の結果、C+S-群の μ -TBS 値と C-S-群の値との間には有意差を認めないものの、C+S+群値は C-S+群値より、危険率 1%で有意に大きいことが確認された。また、動的荷重の負荷は、象牙質レジンコーティングの有無にかかわらず、危険率 1%で高度に有意な μ -TBS 値の減弱を生じさせていた。

以上から、動的荷重の負荷は、 μ -TBS 値を有意に減弱させるものの、象牙質レジンコーティングによってその減弱が抑制されることが明らかになった。

(2) 接着信頼性に及ぼす象牙質レジンコーティングおよび動的荷重の影響

各条件下の μ -TBS 値について、メジアンランク法によるワイブル分析を行った。

Fig. 8 に、縦軸に累積破壊確率 (%) を、横軸に μ -TBS 値をとり、4 種条件下それぞれのワイブルプロット (n=40) に基づき Gauss の最小二乗法から求めた回帰直線を示す。なお、図中には回帰直線の傾きであるワイブル係数 (m 値) を併記する。

4 種条件下の m 値について、回帰直線の傾きの有意差検定を行った結果、C+S-群の m 値は、C-S-群値より危険率 1%で有意に小さく、C+S+の m 値は、C-S+群値より危険率 1%で有意に大きいことが確認された。また、S+条件下の m 値は、象牙質レジンコーティングの有無にかかわらず、S-条件下の m 値より危険率 1%で有意に小さいことが確認された。

以上から、象牙質レジンコーティング実施による髄側象牙質窩壁への接着強さ獲得に際しての接着信頼性は、動的荷重の有無によって変化することが明らかになった。一方、動的荷重の負荷は、象牙質レジンコーティングの有無にかかわらず、髄側壁部の接着信頼性を低下させることが明らかになった。

(3) 累積破壊確率 10%・90%条件下における象牙質レジンコーティングおよび動的荷重の有無による接着耐久性

Fig. 8 に、累積破壊確率 10%と 90%における 4 種条件間の推定 μ -TBS 値を付記した。

累積破壊確率 10%における推定 μ -TBS 値は、 $C-S- > C+S- > C+S+ > C-S+$ の順に小さな値となり、いずれの 2 条件間においても危険率 5%の有意差が認められた。

また、累積破壊確率 90%における推定 μ -TBS 値は、 $C+S- > C-S- > C+S+ > C-S+$ の順に小さな値となり、 $C-S+$ 推定値は、他の 3 条件値より危険率 5%で有意に小さい値を示し、 $C+S+$ 推定値は $C+S-$ ・ $C-S-$ より危険率 5%で有意に小さい値を示した。

以上から、接着破壊に要する応力は、破壊が生じやすい環境（累積破壊確率 90%）と生じにくい環境（累積破壊確率 10%）によって変化した。また動的荷重(S+)条件下において、象牙質レジンコーティングの実施は、接着破壊に要する応力値を有意に増大させ、接着耐久性の向上に有益であることが判明した。

2) μ -TBS 値測定後の破断面様相

(1) 光学顕微鏡による観察

Table 3 に、光学顕微鏡によって観察した 4 条件下の μ -TBS 値測定後の破断面様相を示す。

破断面観察の結果、被着体である象牙質内ならびにセラミックアンレー体内の凝集破壊を含む破断面様相は観察されず、修復物とレジンセメント間の界面破壊 (R_i)、レジンセメント内凝集破壊 (C_c)、レジンセメントと象牙質レジンコーティング間の界面破壊 (C_i)、レジンセメントと象牙質間の界面破壊 (D_i) による、それらの単独あるいは混合破壊であった。

また、 $C+S-$ 条件と $C-S-$ 条件では、 C_c と D_i または C_i による混合破壊、すなわちレジンセメント下部における混合破壊が主体であった。

一方、 $C+S+$ 条件と $C-S+$ 条件では R_i と C_c による混合破壊、すなわちレジンセメント上部における混合破壊が主体であった。

以上から、修復試料の最弱部は、動的荷重の負荷によって、レジンセメント内部とレジンセメント下部から、レジンセメント内部とレジンセメント上部へと変化することが判明した。

(2) SEM による観察

Fig. 9-12 に、各条件下において観察された代表的な破断面 SEM 像を示す。

Fig. 9 は、 $C+S-$ 条件下において、 μ -TBS 値：10.47 MPa を示し、光学顕微鏡観察によって C_c+C_i と読影した試料の破断面 SEM 像である。60 倍像では、波状を呈する C_c と C_i による混合破壊が認められた。また、600 倍像では鱗片状の C_c が観察できた。

Fig. 10 は、 $C+S+$ 条件下において、 μ -TBS 値：8.19 MPa を示し、光学顕微鏡観察によっ

て Ri+Cc と読影した試料の破断面 SEM 像である。60 倍像では Ri と Cc による混合破壊が認められた。また、600 倍像では Ri と粗面を呈する Cc の移行部が観察できた。

Fig. 11 は、C-S-条件下において、 μ -TBS 値：11.23 MPa を示し、光学顕微鏡観察によって Cc+Di と読影した試料の破断面 SEM 像である。60 倍像では Cc と Di による混合破壊が認められた。また、600 倍像では Cc と象牙細管の存在が確認できる Di の移行部が観察できた。

Fig. 12 は、C-S+条件下において、 μ -TBS 値：6.55 MPa を示し、光学顕微鏡観察によって Ri+Cc と読影した試料の破断面 SEM 像である。60 倍像では Ri と Cc による混合破壊が認められた。また、600 倍像では Ri と粗面を呈する Cc の移行部が観察できた。

2. 実験 2：ボンディング材事前塗布の有無が CAD/CAM セラミックアンレー修復の接着に及ぼす影響

実験 2 においては、実験 1 の結果を受けて、最も臨床的な条件である C+S+条件を採択し、修復物内面および象牙質レジンコーティング表面へのボンディング材事前塗布の有無が修復の接着一体化に及ぼす影響について検討した。

1) μ -TBS 値について

(1) ボンディング材事前塗布の有無による影響

Fig. 13 に、被着面へのボンディング材事前塗布によって得られた μ -TBS 値 (s.d.) を示す。

実験 1 で得た、ボンディング材事前塗布を行っていない C+S+群値を対照群として、t 検定を行った結果、ボンディング材事前塗布を行った C+S+B+群の μ -TBS 値は、C+S+群値より危険率 1%で高度に有意な大きい値を示した。

以上から、修復物内面ならびに象牙質レジンコーティング表面へのボンディング材事前塗布は、髄側壁接合界面部の接着強さ増強に有効であることが判明した。

(2) ボンディング材事前塗布が接着信頼性に及ぼす影響

Fig.14 に、ボンディング材事前塗布によって得た μ -TBS 値について、ワイブル分析を行った結果を示す。

C+S+群を対照として、回帰直線の傾きの有意差検定を行った結果、C+S+B+群の m 値は、C+S+群値より危険率 5%で有意に小さい m 値を示した。

以上から、ボンディング材事前塗布は、髄側壁接合界面部の接着強さ獲得に際しての信頼性向上には貢献していないことが明らかになった。

(3) 累積破壊確率 10%・90%条件下における接着耐久性

Fig.14 に、累積破壊確率 10%と 90%におけるボンディング材事前塗布の有無条件間の推定 μ -TBS 値を付記した。

累積破壊確率 10%ならびに 90%における推定 μ -TBS 値は、 $C+S+B+ > C+S+$ の大小関係にあり、2 条件間には危険率 5%の有意差が認められた。

したがって、接着破壊に要する応力は、破壊が生じやすい環境（累積破壊確率 90%）と生じにくい環境（累積破壊確率 10%）にかかわらず、ボンディング材事前塗布によって値が増大することが判明した。

以上から、ボンディング材事前塗布は、接着破壊に要する応力値を有意に増大させ、接着耐久性の向上に有益であることが判明した。

2) μ -TBS 値測定後の破断面様相

(1) 光学顕微鏡による観察

Table 4 に、ボンディング材事前塗布条件下の破断面様相を示す。

破断面観察の結果、被着体である象牙質内ならびにセラミックアンレー体内の凝集破壊を含む破断面様相は観察されず、破断面は修復物とレジンセメント間の界面破壊 (R_i)、レジンセメント内凝集破壊 (C_c)、レジンセメントと象牙質レジンコーティング間の界面破壊 (C_i) による、それらの単独あるいは混合破壊であった。

また、ボンディング材事前塗布条件下の破断面は、 R_i と C_c による混合破壊が、全試料数の 45%を占めていた。さらに、ボンディング材事前塗布によって、 C_c のみによって構成される破断面試料の確認率が、非塗布条件の 10%から 43%へと増加していた。

以上から、ボンディング材事前塗布は、修復の接着一体化を促すことが明らかとなった。

(2) SEM による観察

被着面へのボンディング材事前塗布条件下において観察された代表的な破断面 SEM 像を示す。

Fig. 15 は、 $C+S+B+$ 条件下において、 μ -TBS 値 : 9.88 MPa を示し、光学顕微鏡観察によって R_i+C_c と読影した試料の破断面 SEM 像である。60 倍像では R_i と C_c による混合破壊が認められた。また、600 倍像では R_i と C_c の移行部が観察できた。

考 察

1. 実験 1 : 象牙質レジンコーティングおよび動的荷重の有無が CAD/CAM セラミックアンレー修復の接着に及ぼす影響

1) μ -TBS 値について

(1) 象牙質レジンコーティングおよび動的荷重の有無による影響

動的荷重の負荷は、 μ -TBS 値を有意に減弱させるものの、象牙質レジンコーティングによってその減弱が抑制されることが明らかになった。

象牙質レジンコーティング法は、その応用によって歯質と修復物との適合性¹⁰⁾・接着性¹¹⁻¹²⁾・辺縁封鎖性の向上¹³⁾に有効であり、象牙質と歯髄の保護¹⁴⁾、さらにはメタルフリー修復に求められる歯質との接着一体化に欠かせない処置法とされている。

また、Feitosa ら¹⁵⁾は、象牙質レジンコーティングが、温度・荷重複合ストレス条件下における高い接着強さの獲得に有効であると述べている。

本実験では、非象牙質レジンコーティング（C-）群への動的荷重の負荷によって、接着強さは非負荷群値の 60%値にまで減弱したが、象牙質レジンコーティング（C+）群では非負荷群値の 76%値への減弱に留まった。

これは、コーティング層が接着強さの減弱を抑制するストレスブレーカーとしての役割を担い、接着強さの減弱抑制に寄与したと考える。したがって、CAD/CAM セラミックアンレー修復に際しての象牙質レジンコーティング法の実施は、長期的予後を見据えた場合、望ましい接着の維持に有用であると推察できる。

一方、本実験では、修復試料に対して、荷重 157N を 300,000 回負荷する動的荷重負荷条件を設定した。口腔内環境下で生じる代表的なストレス因子としては、摂食時の咀嚼による動的荷重ストレスと温度の異なる飲食物摂取による温度ストレスとを挙げることができる。

原ら⁷⁾は、口腔内環境想定 of ストレス因子のうち、荷重ストレスと温度ストレスとを比較検討した。その結果、特に歯頸部修復においては、荷重ストレスが接着の減弱に大きな影響を与える因子であることを報告している。また、三浦ら¹⁶⁾は、各歯群の最大咬合圧と咀嚼時における咬合圧について検討している。その結果、大臼歯における最大咬合圧は成人男性が約 31kg、成人女性が約 22kg であると報告しており、さらに日常に咀嚼する際の咬合圧は一般に最大咬合圧の 1/2～1/4 程度であると述べている。したがって、本実験の動的荷重 157N（16kgf 相当）は、口腔内条件と同等または厳しい条件として捉えることができよう。

斉藤ら¹⁷⁾は、1 回の食事における咀嚼回数は 620 回であると報告している。これを本実験の荷重負荷回数 300,000 回に適用した場合、1 日 3 回の食事回数として約 5 か月の期間に相当するが、不眠不休で連続的に摂食する条件といえる。したがって、本実験における動的荷重の設定条件は、実際の口腔内における侵襲と比較して、苛酷な条件設定として捉えることができよう。

山田ら⁸⁾は、下顎大臼歯の MODB 窩洞に対しハイブリッドセラミックアンレー修復を行い、動的荷重の負荷は、特に髄側壁の接着強さを減少させることを報告している。

本実験に用いた歯科切削加工用セラミックスである VITABLOCS for CEREC/inLab の弾性係数は、製造者発表によって 45 ± 0.5 GPa とされている。この値は、前述のハイブリッドセラミックの製造者発表による弾性係数 28.6 GPa より大きな数値である。したがって、動的荷重による影響が、装着した修復物を介して髄側壁接着界面に対し直接的に伝播し、接着強さを減弱させたものと考ええる。

(2) ワイブル分析による検討

in vitro 接着強さについて評価を行う場合、実験室環境は実際の診療における口腔内環境と比較してはるかに理想的環境といえる。この良好な環境下における歯面処理、接着操作、

仕上げ・研磨などを経て得られたデータは、これまで主に平均値と標準偏差に基づく各種の統計学的分析法によって検討されてきた。

しかし、日常の臨床では、接着に不利に働く修復歯面の部位や組織学的性状、処置環境などを含めた多様な難条件下における処置が求められ、*in vitro* データと同等の接着強さの獲得は困難となっても不思議ではない。したがって、客観的な数値としての接着強さに対する量的な評価を経て、さらにそれら数値に隠された質的様態を抽出し、解析することは臨床的にも意義がある。

ワイブル分析は、信頼性を評価する際に用いられる分析法であり、歯科領域の研究においても接着試験後の評価に用いられている¹⁸⁻²⁰⁾。

Robin ら²¹⁾ は、ワイブル係数 (*m* 値) が大きいほど欠陥の分布も均一であり、破壊挙動の予測が容易であることから、全ての材料において望ましく、逆にワイブル係数が小さいほど、欠陥の分布も不均一であり、破壊挙動の予測は困難である、と述べている。すなわち、大きい *m* 値を示す条件は、破壊挙動の予測が容易であり、欠陥の分布も均一なことから、条件固有の接着強さ獲得における信頼性に優れていると考えることができる。

また ISO/TS 11405²²⁾ では、接着試験後のワイブル分析に際し、累積破壊確率 10% と 90% の破壊を生じる応力は、その接着の強さを特徴づけるのに有益な方法であるとして提唱している。

そこで本研究では、被着面の処理と動的荷重が接着強さに及ぼす影響を明らかにする一法として、得られた μ -TBS 値に対しワイブル分析を行い、接着信頼性についての検定を行った。

(3) 接着信頼性に及ぼす象牙質レジンコーティングおよび動的荷重の有無による影響

ワイブル分析の結果、非動的荷重負荷(S-)条件において、象牙質レジンコーティング(C+)群と比較して、非象牙質レジンコーティング(C-)群が高い接着信頼性を示した。

この事象については、接着破断部位の主体がレジンセメントの下部であったことから推察すると、被着面となった象牙質とレジンコーティング材との違いならびに表面処理の違いが反映したものとして捉えることができる。つまり、レジンセメントの被着面として、レジンコーティングより象牙質である場合の方が、安定した表面処理効果を得ると同時に、一定レベル以下の応力値では接着破壊が発生せず、一方、一定レベル以上の応力値によって一律に接着破壊が生じる状態にあると考える。

しかし、この非動的荷重負荷(S-)条件、すなわち臨床的には在りえない環境より口腔内環境に近似している動的荷重負荷(S+)条件においては、象牙質レジンコーティング(C+)群が非象牙質レジンコーティング(C-)群より高い接着信頼性を示した。この事象は、接着破断部位の主体がレジンセメントの上部であったことから推察すると、動的荷重に対し、コーティング層がストレスブレイカーの役割を担い、接着界面に対する動的荷重の影響を軽減したと捉えることができる。

さらに本実験の結果、動的荷重の負荷は、象牙質レジンコーティングの有無にかかわらず、髄側壁部の接着信頼性を低下させることが明らかになった。したがって、咀嚼力をはじめと

する臨床的な動的荷重に相対する窩壁については、術者として慎重な対応が求められ、接着信頼性の堅持は叶わないものの、信頼性低下の抑制に有益なレジンコーティングの実施をはじめ、術者のみが成し得る的確な手技の励行が大切となる。

(4) 累積破壊確率 10%・90%条件下における 象牙質レジンコーティングおよび動的荷重の有無による接着耐久性

接着破壊に要する応力は、破壊が生じやすい環境（累積破壊確率 90%）と生じにくい環境（累積破壊確率 10%）との条件によって変化した。また動的荷重(S+)条件下において、象牙質レジンコーティングの実施は、接着破壊に要する応力値を有意に増大させ、接着耐久性の向上に有益であることが判明した。

接着強さ値に対する累積破壊確率について、Clark ら²³⁾は1%と5%を、Munck ら²⁴⁾は10%を、原ら⁷⁾、山田ら⁸⁾、長谷川ら²⁵⁾は10%と90%を対象として取り組んでいる。

破壊が生じやすい環境(累積破壊確率 90%)とは、非常に多数の試料(ISO の指標では全試料の 90%)で接着破壊が生じてしまう環境を意味する。しかし、近年のレジン系材料を活用した場合、非常に多くの症例において、脱落、術後痛、褐線、二次齲蝕の発現などの接着破壊に関連する予後が頻発する状況ではないことは周知である。したがって、指標としての意義は理解できるものの、口腔内環境を想定した臨床的条件とは言い難いと考える。

一方、破壊が生じにくい環境(累積破壊確率 10%)とは、非常に少数の試料(ISO の指標では全試料の 10%)で接着破壊が生じる環境を意味する。前述のとおり、近年のレジン系材料を適切に臨床応用した場合には、不良予後は頻発しないことから、この環境の方が口腔内条件を反映した臨床的指標として受け入れやすい。

この点について、Foster ら²⁶⁾は、矯正用接着材のヒト抜去小臼歯に対する剪断接着強さを測定し、得られたデータに対し一元配置分散分析とワイブル分析によって評価を行っている。加えて、累積破壊確率 10%の剪断接着強さ値を臨床的予後と関連付けて考察している。

本実験においては、破壊の生じにくい環境(累積破壊確率 10%)では、動的荷重の有無にかかわらず、象牙質レジンコーティング(C+)群が非象牙質レジンコーティング(C-)群より有意に大きな推定破壊応力値を示した。したがって、象牙質レジンコーティングの適用は、临床上、有益な対応として考えることができよう。

2) μ -TBS 値測定後の破断面様相について

各条件 40 試料の破断面観察の結果、修復試料の最弱部は、動的荷重の負荷によって、レジンセメント内部とレジンセメント下部からレジンセメント内部とレジンセメント上部へと変化することが判明した。

これは、S-条件という口腔内環境では在りえない恵まれた条件下において、一定レベルの接着一体化が成されている接合部に対し、破壊が生じるまでの強制的応力を負荷した場合の最弱部がレジンセメントの下部であったものが、動的荷重の負荷によって、弾性率が大きく異なる修復物とレジンセメント間の界面部に応力の集中が生じることによって、最弱部が変化したものと考ええる。

また、いずれの条件においても、レジンセメント内の凝集破壊が含まれていることから、レジンセメント自体の構造的欠陥や機械的性質の脆弱性が少なからず影響しているものと推察できる。

2. 実験 2：ボンディング材事前塗布の有無が CAD/CAM セラミックアンレー修復の接着に及ぼす影響

1) μ -TBS 値について

(1) ボンディング材事前塗布の有無による影響

ボンディング材の修復物ならびに象牙質レジンコーティング表面への事前塗布は、髄側壁接合界面部の接着強さ増強に有効であることが判明した。

これは、レジンコーティング表面に対するシランカップリング材による改質を経て、レジンセメントペーストのぬれ性が、ボンディング材の事前塗布によって向上し、接合界面部における“なじみ”が改善されることによって、修復物と歯質との接着一体化に寄与したものと考える。

(2) ボンディング材事前塗布が接着信頼性に及ぼす影響

ワイブル分析の結果、ボンディング材事前塗布は、髄側壁接合界面部の接着強さ獲得に際しての信頼性向上には貢献していないことが明らかになった。

破断面観察の結果を踏まえると、ボンディング材事前塗布によって、修復物とレジンセメントとの界面を含む破壊が減少し、レジンセメント内部の凝集破壊が増加していることから、ボンディング材事前塗布は、接着一体化に貢献していると考ええる。

しかし、修復物とレジンセメント間に堅固な接着が獲得された結果、それまで不顕性であったレジンセメント自体がもつ破壊耐性の不確かさが表面化することによって、ボンディング材事前塗布が接着強さ獲得に際しての信頼性向上に至らなかったものと推察できる。

(3) 累積破壊確率 10%・90%条件下における接着耐久性

ボンディング材事前塗布は、接着破壊に要する応力値を有意に増大させ、接着耐久性の向上に有益であることが判明した。

口腔内は、頻度の差こそあれ、大小多様な応力が絶え間なく複雑に発生する苛酷な環境である。修復に際しては、弱小な応力によって接着破壊が生じてしまう環境（累積破壊確率 10%）下においても、また強大な応力によって接着破壊が生じる環境（累積破壊確率 90%）下においても、ともに接着一体化を堅持できることが望ましい。この観点において、ボンディング材事前塗布は、アンレー修復の接着耐久性を向上させていることから、複雑な操作手順や特別な機材を用いることなく、堅固な修復を得るための効果的な一法といえよう。

2) μ -TBS 値測定後の破断面様相について

ボンディング材事前塗布条件下の破断面は、Ri と Cc による混合破壊が全試料数の 45% を占め、さらに Cc のみの破断試料が同 43% であった。

これはボンディング材事前塗布を行わない条件下の最弱部であった修復物とレジンセメントとの接合界面部の接着が、ボンディング材事前塗布によって接着一体化が図られ、最弱部がレジンセメント内の構造的欠陥に移行したと捉えることができる。

したがって、今後は、レジンセメント自体の物性向上を図ることによって、修復物と歯質との一体化増強が図られた接着が期待できる。

しかし、未だに破断面の主体は、修復物とレジンセメント間の界面破壊が含まれていることから、事前塗布に用いるボンディング材に対しても、重合性能の向上などの改善余地が残されていると考える。

結 論

チェアサイド型歯科用 CAD/CAM システムを用いた修復法は、従来の間接修復法に匹敵する精度を保ちつつ、患者・術者双方の負担を軽減することが可能な、次世代歯冠修復の一翼を担う有用な修復法である。

そこで本研究では、被着面処理が CAD/CAM セラミックアンレー修復の接着に及ぼす影響を明らかにすることを目的に、実験 1 では、窩洞内象牙質面に対する象牙質レジンコーティングと動的荷重の有無による影響について、実験 2 では、実験 1 で得た接着最弱部に対する改善処置としてのボンディング材事前塗布の有効性について、micro-tensile bond test による髄側壁象牙質面への引張接着強さ(μ -TBS)を測定し、ワイブル分析による接着信頼性と接着耐久性の評価を含めた検討を行い、以下の結論を得た。

1. 動的荷重の負荷は、 μ -TBS 値を有意に減弱させるものの、象牙質レジンコーティングによってその減弱は抑制される。
2. 象牙質レジンコーティングの有無にかかわらず、髄側壁部の接着信頼性は動的荷重の負荷によって低下する。
3. 接着破壊に要する応力は、破壊が生じやすい環境（累積破壊確率 90%）と生じにくい環境（累積破壊確率 10%）によって変化した。また動的荷重負荷条件下において、象牙質レジンコーティングは、接着破壊に要する応力値を有意に増大させ、接着耐久性の向上に有益である。
4. 修復物内面および象牙質レジンコーティングを含む窩洞内面へのボンディング材事前塗布は、非塗布の修復に比較し、髄側壁接合界面部の接着強さを増大させ、かつ接着耐久性の向上に有益である。

謝 辞

稿を終えるにあたり、御懇篤なる御高配を賜りました日本歯科大学生命歯学部 歯科保存学講座勝海一郎教授に謹んで深甚なる謝意を表します。

また、本研究の遂行と編纂において、終始温かい励ましとご指導を頂戴した接着歯科学講座 奈良陽一郎教授ならびに数々の御教示を下さった山田 正 助教に厚く御礼申し上げます。

最後に、常に変わらぬ御支援を頂きました接着歯科学講座、歯科保存学講座および日本歯科大学附属病院総合診療科の諸先生方に謝意を表します。

文 献

1) Ural C, Burgaz Y, Saraç D : In vitro evaluation of marginal adaptation in five ceramic restoration fabricating techniques. Quintessence Int 41 : 585～590, 2010.

2) Frankenberger R, Kramer N, Appelt A, Lohbauer U, Naumann M, Roggendorf MJ : Chairside vs. labside ceramic inlays: effect of temporary restoration and adhesive luting on enamel cracks and marginal integrity. Dent Mater 27 : 892～898, 2011.

3) 二階堂 徹 : コンポジットレジン修復－直接法と間接法の選択基準. 歯理工誌 29 : 17～20, 2010.

4) 松村光明 : 金属アレルギーの治療の流れとメタルフリー修復の現状. 日歯医師会誌 60 : 732～745, 2007.

5) 二階堂 徹, 來山修三, 高橋玲奈, 有吉芽生, 高垣智博, 井上 剛, 田上順次 : 間接修復法におけるレジンコーティング法について. 日本歯科評論 803 : 85～90, 2009.

6) Sano H, Shono T, Sonoda H, Takatsu T, Ciucchi B, Carvalho R, Pashley DH : Relationship between surface area for adhesion and tensile bond strength--evaluation of a micro-tensile bond test. Dent Mater 10 : 236～240, 1994.

7) 原 学, 貴美島 哲, 奈良陽一郎 : 口腔内環境想定ストレス因子が歯頸部コンポジットレジン修復の接着特性に及ぼす影響 接着信頼性について. 接着歯学 28 : 121～132, 2010.

8) 山田 正, 柵木寿男, 奈良陽一郎 : 動的荷重がハイブリッドセラミックアンレー修復の接着に及ぼす影響. 日歯保存誌 54 : 347～360, 2011.

9) 大下純世, 奈良陽一郎, 田中久義 : 角柱状試料形態と Micro-tensile bond strength との関係. 接着歯学 23 : 22～33, 2005.

10) Jayasooriya PR, Pereira PNR, Nikaido T, Burrow MF, Tagami J : The effect of a resin coating on the interfacial adaptation of composite inlays. Oper Dent 28 : 28～35, 2003.

- 11) Magne P, Kim TH, Cascione D, Donovan TE : Immediate dentin sealing improves bond strength of indirect restorations. J Prosthet Dent 94 : 511～519, 2005.
- 12) Islam MR, Takada T, Weerasinghe DS, Uzzaman MA, Foxton RM, Nikaido T, Tagami J : Effect of resin coating on adhesion of composite crown restoration. Dent Mater J 25 : 272～279, 2006.
- 13) 大槻昌幸, 山田敏元, 猪越重久, 織田裕康 : 低粘性レジンのコンプोजिटレジンインレー修復への応用. 接着歯学 10 : 147～148, 1992.
- 14) Momoi Y, Akimoto N, Kida K, Yip KH, Kohno A : Sealing ability of dentin coating using adhesive resin systems. Am J Dent 16 : 105-111, 2003.
- 15) Fetiosa VP, Medina ADC, Puppim-Rontani RM, Correr-Sobrinho L, Sinhoreti MAC : Effect of resin coat technique on bond strength of indirect restorations after thermal and load cycling. Bull tokyo dent coll 51 : 111～118, 2010.
- 16) 三浦不二夫, 角田正明 : 咬合圧(咀嚼圧)に関する研究. 日歯医師会誌 7:293～298, 1965.
- 17) 文部省特定研究「咀嚼システムの基礎的研究」総括班 : 咀嚼システム入門. 風人社 : 東京, 1987, pp. 115～129.
- 18) 真壁 肇, 宮村鐵夫, 鈴木和幸 : 信頼性モデルの統計解析. 共立出版 : 東京, 1998, pp. 1～14.
- 19) McCabe JF, Carrick TE : A statistical approach to the mechanical testing of dental materials. Dent Mater 2 : 139～142, 1986.
- 20) Burrow MF, Thomas D, Swain MV, Tyas MJ : Analysis of tensile bond strengths using Weibull statistics. Biomater 25 : 5031～5035, 2004.
- 21) Robin C, Scherrer SS, Wiskott HWA, De Rijk WG, Belser UC : Weibull parameters of composite resin bond strengths to porcelain and noble alloy using the Rocatec system. Dent Mater 18 : 389～395, 2002.
- 22) ISO: Dental materials – Testing of adhesion to tooth structure. ISO/TS 11405, 2003.
- 23) Clark SA, Gordon PH, McCabe JF : An ex vivo investigation to compare orthodontic bonding using a 4-META-based adhesive or a composite adhesive to acid-etched and sandblasted enamel. J Orthod 30 : 51～58, 2003.
- 24) De Munck J, Luehrs AK, Poitevin A, Van Ende A, Van Meerbeek B : Fracture toughness versus micro-tensile bond strength testing of adhesive-dentin interfaces. Dent Mater 29 : 635～644, 2013.
- 25) 長谷川 充, 奈良陽一郎 : 窩洞形態がセルフエッチアドヒーシブシステムの窩底部象

牙質接着に及ぼす影響 接着信頼性の評価検討. 日歯保存誌 52 : 68～80, 2009.

26) Foster JA, Berzins DW, Bradley TG: Bond strength of an amorphous calcium phosphate-containing orthodontic adhesive. Angle Orthod 78 : 339～344, 2008.

図表

表 1

Table 1 Materials

CAD/CAM system	Ingredient	Lot Number	Manufacturer
CEREC AC			SIRONA Dental Systems
CEREC MC XL			
CAD/CAM Restorative Material			
VITABLOCS Mark II CEREC/inLab (Shade : A3C)	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Na ₂ O, K ₂ O, CaO, TiO ₂	37690	VITA
Resin Coating Material			
Clearfil Bond SE One	Bis-GMA, MDP, HEMA, Micro filler, Ethanol, Chemical accelerator, Photo initiator, Refinement water	011115	Kuraray Noritake Dental
Clearfil Protect Liner F	TEGDMA, Bis-GMA, Micro filler, Photo initiator, MMA-MF copolymer	0075BA	
Pretreatment Material			
K-etchant gel	Refinement water, Phosphoric acid, Tinction, Thickener	0495AA	Kuraray Noritake Dental
Clearfil Ceramic Primer	Silane coupling agent, MDP, Ethanol	0024CA	
ED Primer II	HEMA, MDP, Refinement water, Polymerize initiator	0319BA / 0193BA	
Clearfil DC Bond *	Bond A HEMA, Bis-GMA, MDP, Photo initiator, Chemical initiator, Micro filler	011173	
	Bond B Refinement water, Ethanol, Chemical initiator		
Luting Material			
Clearfil Esthetic Cement (Shade : Universal)	Bis-GMA, TEGDMA, Photo initiator, Chemical initiator	038ABA	Kuraray Noritake Dental

* : used for experiment 2

表 2

Table 2 Parameters of MFA and experimental conditions used

Function	Range of parameters available		Experimental conditions use
Rotary wear	Load	20 - 588 N	-
	Rotation degree	90 °	-
	Reciprocating speed	90 times / min	-
	The number of repetition	0 - 10 ⁶	-
Repeated load	Load	20 – 588 N	157 N
	Frequency	0 - 120 stroke / min	90 stroke / min
	The number of stroke	0 - 10 ⁶	300,000
Thermal stress	Warm water	Room temp – 75 °C	37 ± 1 °C
	Cool water	Room temp – 2 °C	-
	Soaking time	5 sec - 24 hrs	Throughout
	Cycling	Yes or Non	Non
	Transfer time	10 sec	-
	The number of cycles	0 - 10 ⁶	0

表 3

**Table 3 Distribution of fracture modes
observed with optical microscope**

		C+S-	C+S+	C-S-	C-S+
Interfacial	Ri	0	3	0	4
	Ri + Cc	3	23	1	19
	Cc + Ci	16	0	-	-
Mix	Cc + Di	-	-	19	6
	Ri + Cc + Ci	10	10	-	-
	Ri + Cc + Di	-	-	10	8
Cohesive	Cc	11	4	10	3

Ri: Interfacial fracture occurred at restorative / resin cement interface

Cc: Cohesive fracture occurred in resin cement

Ci: Interfacial fracture occurred at resin cement / resin coating interface

Di: Interfacial fracture occurred at resin cement / dentin interface

表 4

**Table 4 Distribution of fracture modes observed
with optical microscope**

		C+S+B+
Interfacial	Ri	0
	Ri + Cc	18
Mix	Cc + Ci	1
	Ri + Cc + Ci	4
Cohesive	Cc	17

Ri: Interfacial fracture occurred at restorative / resin cement interface

Cc: Cohesive fracture occurred in resin cement

Ci: Interfacial fracture occurred at resin cement / resin coating interface

☒ 1

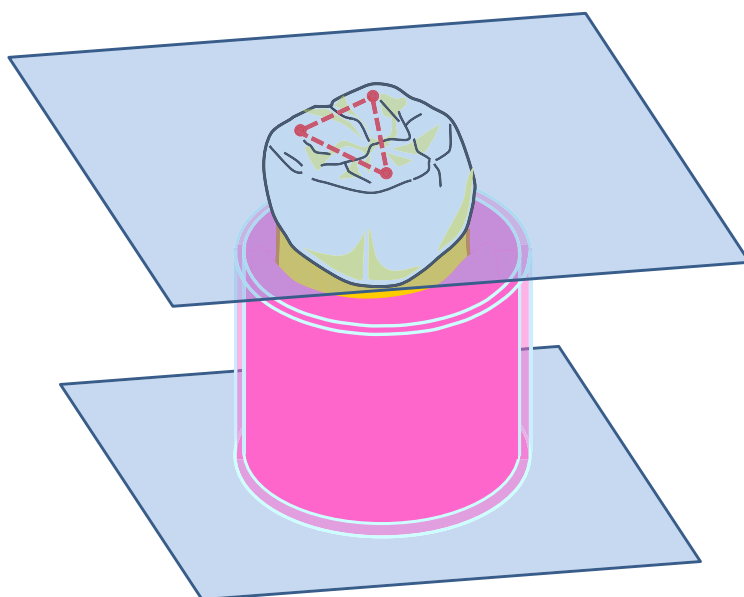


Fig. 1 **Standardized embedding of
extracted human sound upper first molar**

☒ 2



Fig. 2 **Cavity duplicator**

図 3

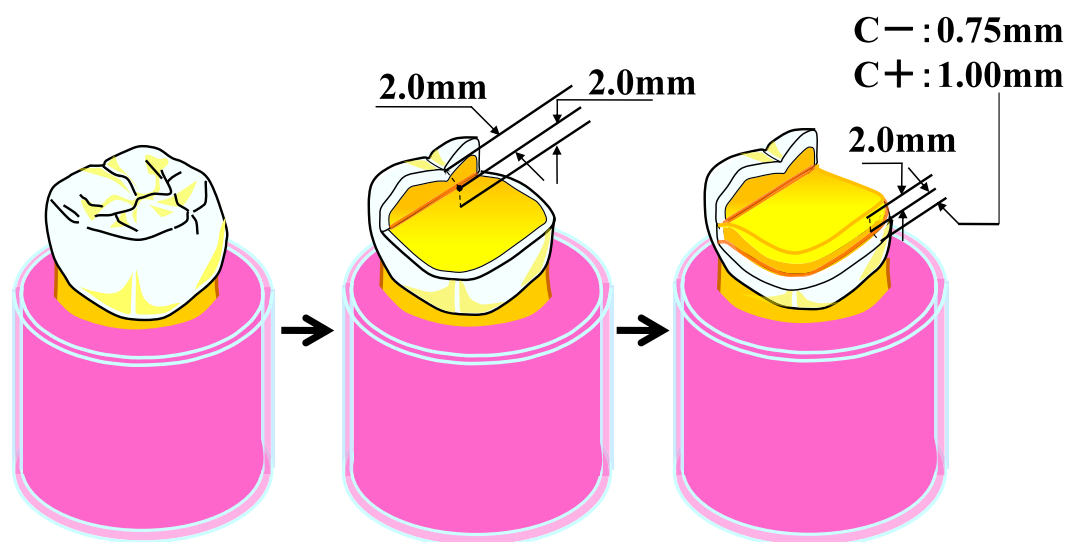


Fig. 3 Procedures of standardized MODP cavity preparation

図 4

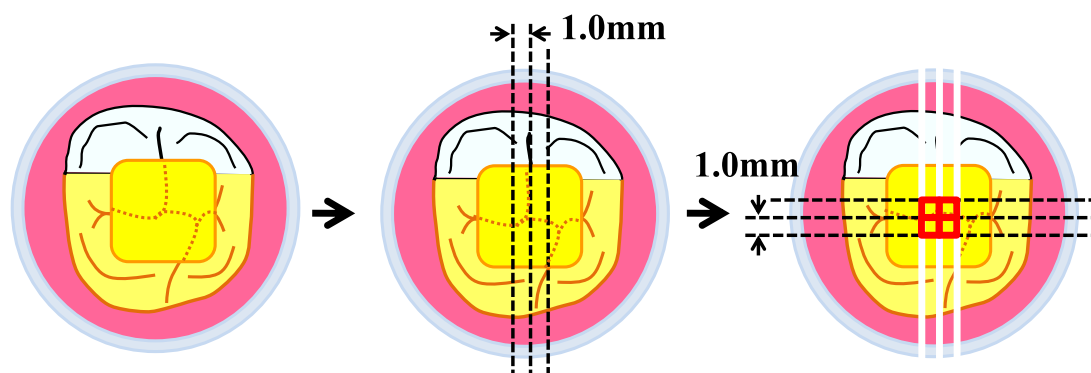


Fig. 4 Procedures of specimen sectioning

図 5

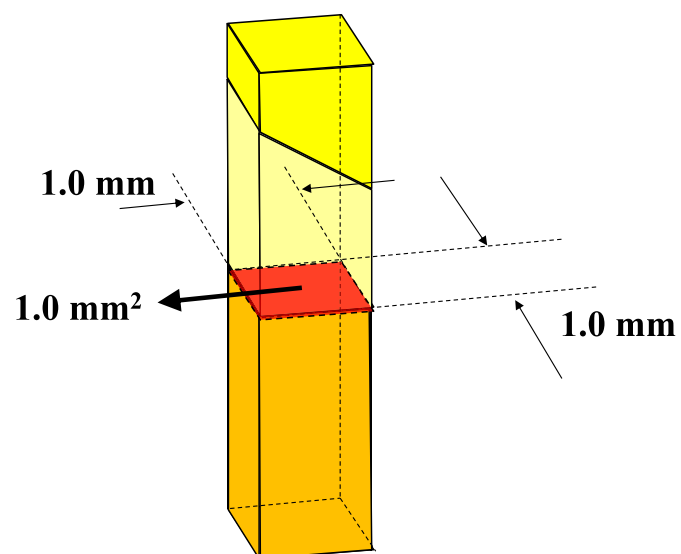


Fig. 5 Beam-shaped test piece

図 6

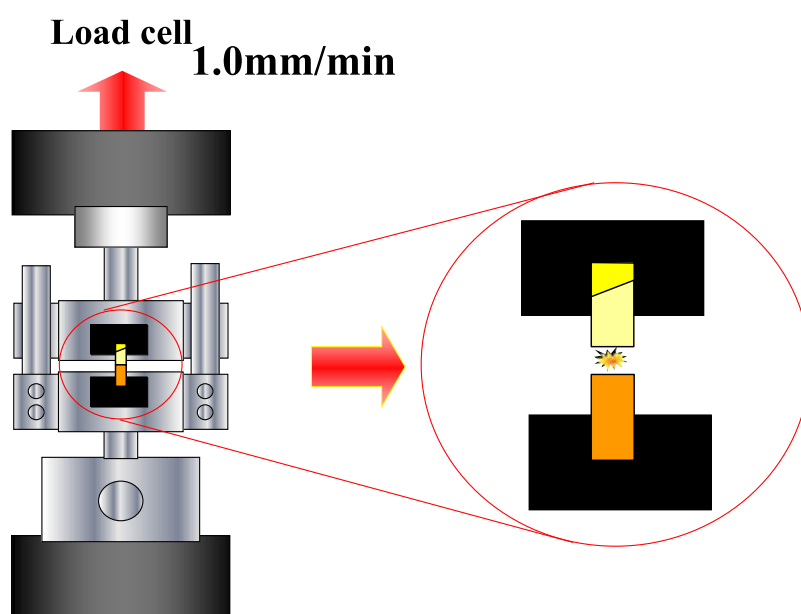


Fig. 6 Measurement method of micro-tensile bond strength

☒ 7

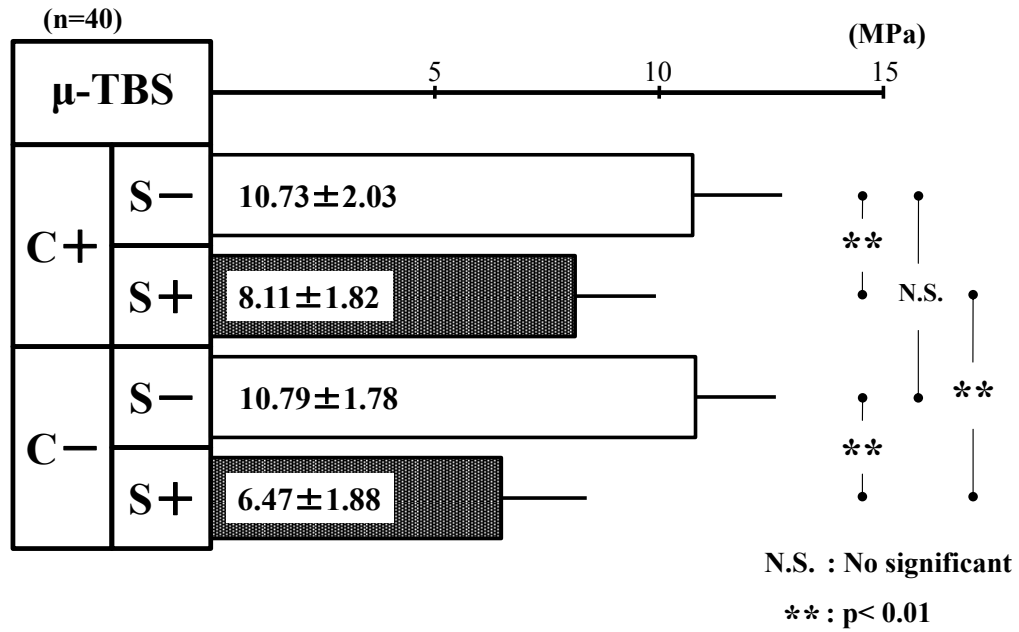
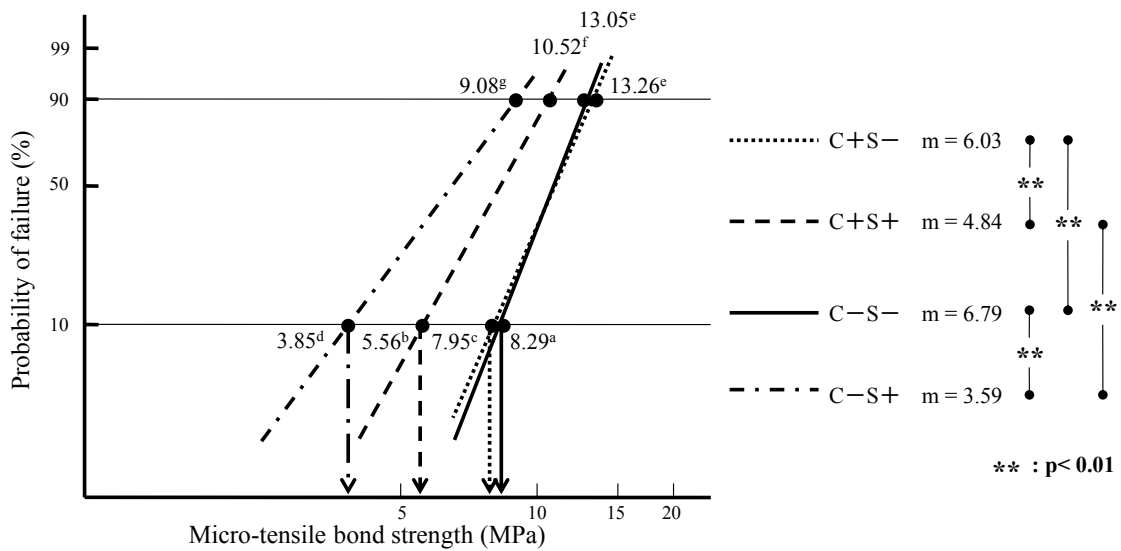


Fig. 7 Mean μ -TBS to pulpal dentin wall with / without immediate dentin sealing and dynamic cyclic load stress

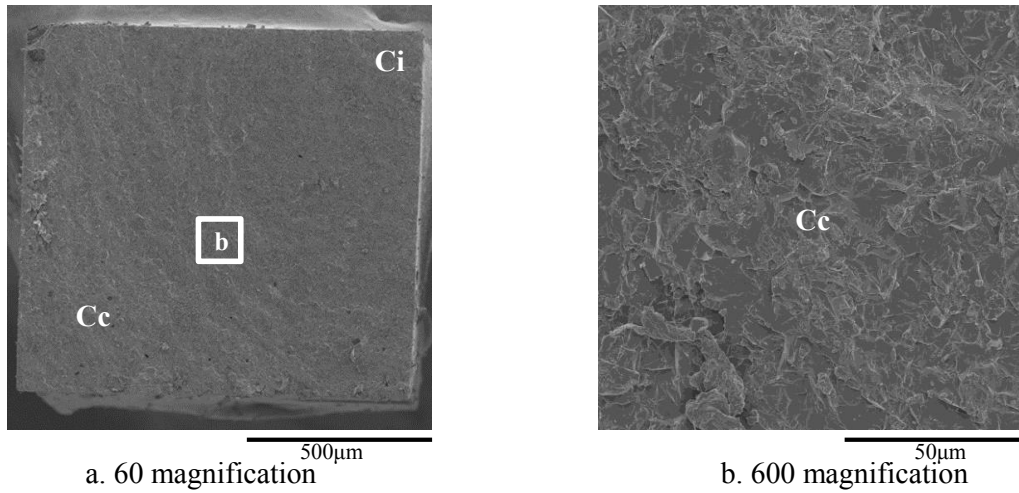
☒ 8



Experimental conditions identified by different superscript letters within the different column are significantly different at p < 0.05

Fig. 8 Differences in probability of failure against μ -TBS among four experimental conditions

☒ 9



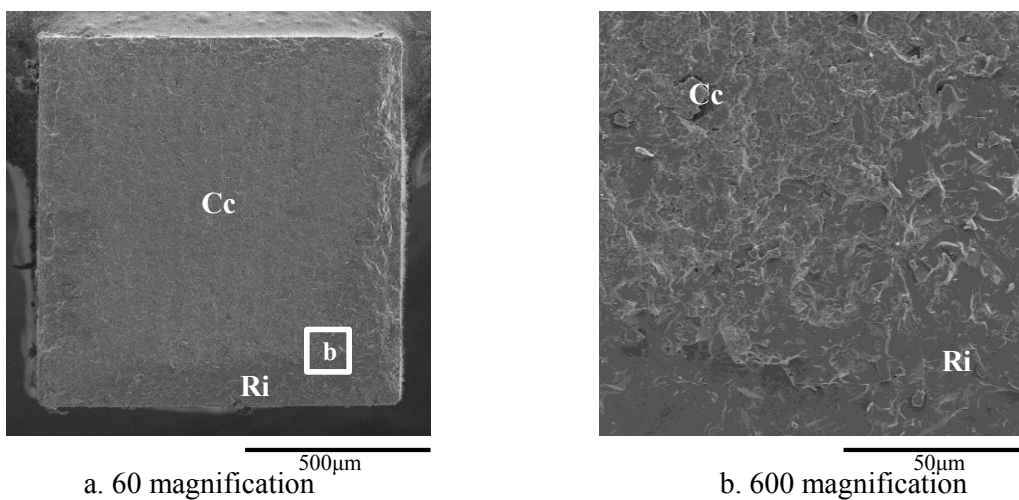
Mixed fracture specimen consists of Cc and Ci provided 10.47 MPa

Cc: Cohesive fracture occurred in resin cement

Ci: Interfacial fracture occurred at resin cement / resin coating interface

Fig. 9 Typical images of C+S- specimen

☒ 10



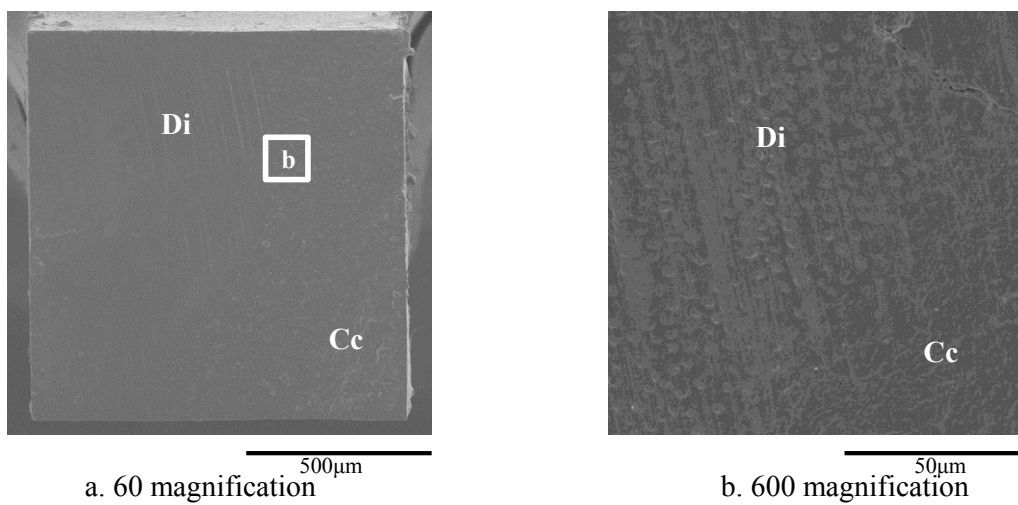
Mixed fracture specimen consists of Ri and Cc provided 8.19 MPa

Ri: Interfacial fracture occurred at restorative / resin cement interface

Cc: Cohesive fracture occurred in resin cement

Fig. 10 Typical images of C+S+ specimen

☒ 11



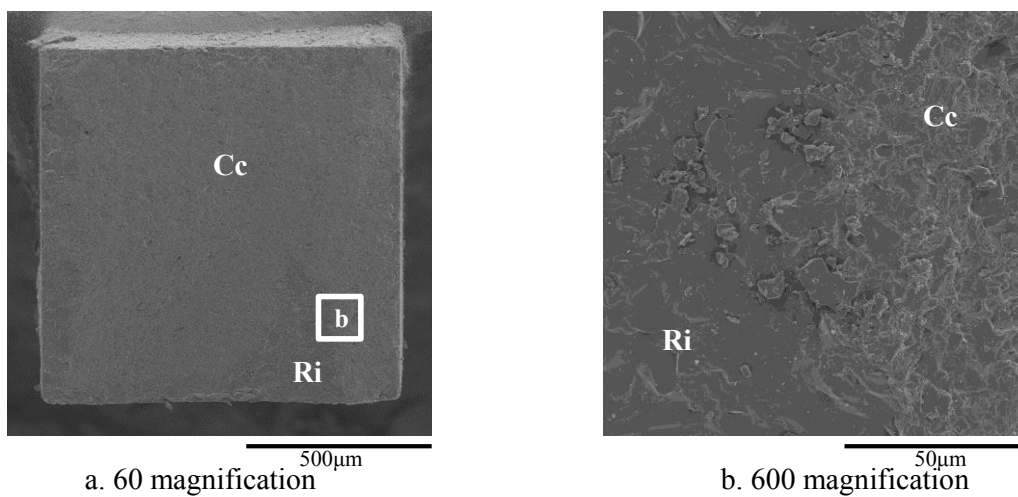
Mixed fracture specimen consists of Cc and Di provided 11.23 MPa

Cc: Cohesive fracture occurred in resin cement

Di: Interfacial fracture occurred at resin cement / dentin interface

Fig. 11 Typical images of C—S— specimen

☒ 12



Mixed fracture specimen consists of Ri and Cc provided 6.55 MPa

Ri: Interfacial fracture occurred at restorative / resin cement interface

Cc: Cohesive fracture occurred in resin cement

Fig. 12 Typical images of C—S+ specimen

☒ 13

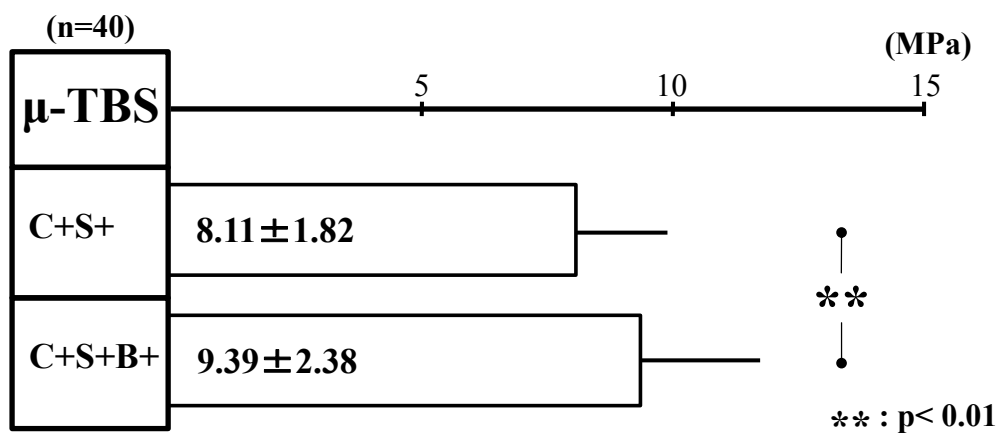


Fig. 13 Mean μ-TBS to pulpal dentin wall with / without application of bonding agent

☒ 14

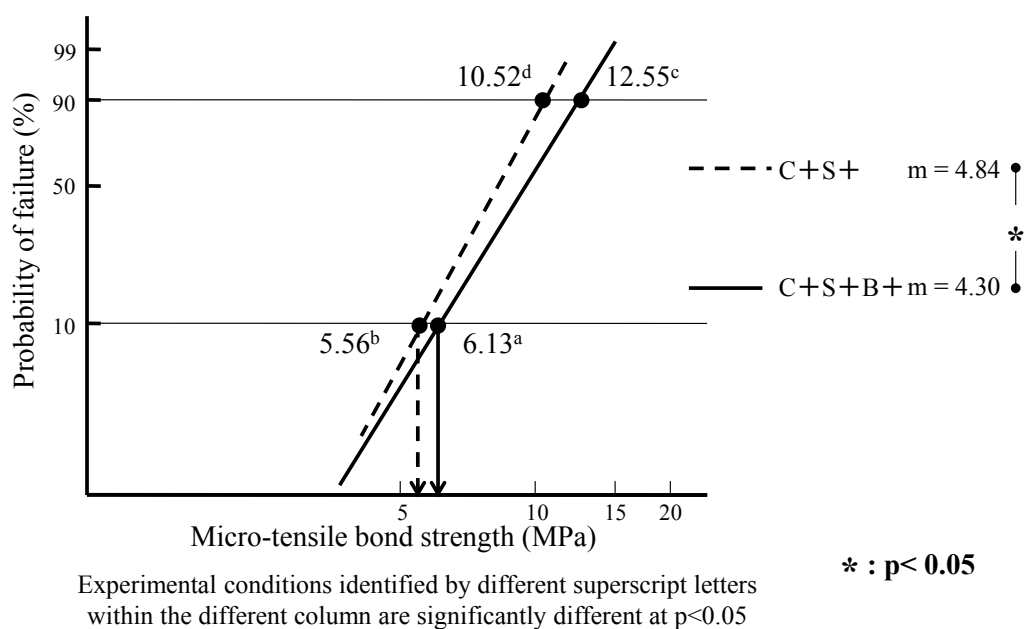
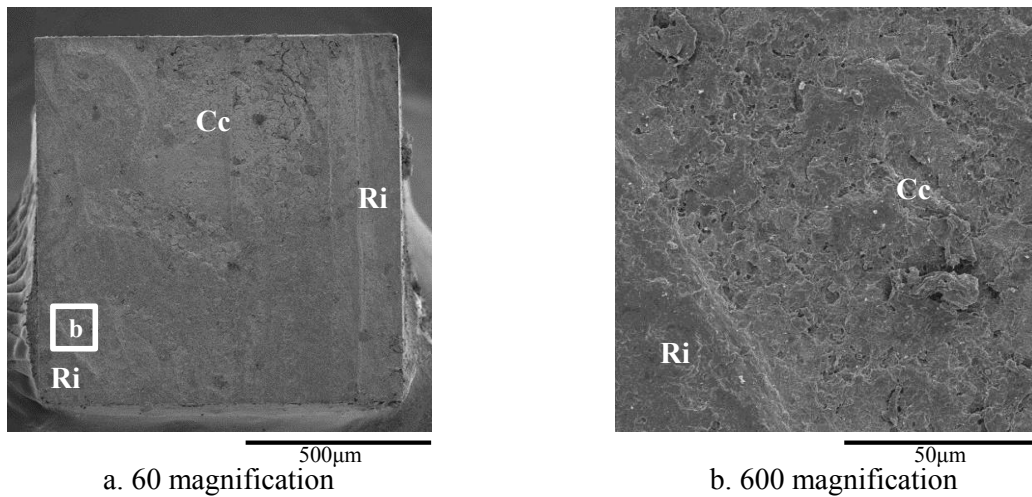


Fig. 14 Difference in probability of failure against μ-TBS among two experimental conditions



a. 60 magnification

b. 600 magnification

Mixed fracture specimen consists of Ri and Cc provided 9.88 MPa

Ri: Interfacial fracture occurred at restorative / resin cement interface

Cc: Cohesive fracture occurred in resin cement

Fig. 15 Typical images of C+S+B+ specimen

付表・付図説明

- | | |
|------|--|
| 表 1 | Materials |
| 表 2 | Parameters of MFA and experimental conditions used |
| 表 3 | Distribution of fracture modes observed with optical microscope |
| 表 4 | Distribution of fracture modes observed with optical microscope |
| 図 1 | Standardized embedding of extracted human sound upper first molar |
| 図 2 | Cavity duplicator |
| 図 3 | Procedures of standardized MODP cavity preparation |
| 図 4 | Procedures of specimen sectioning |
| 図 5 | Beam-shaped test piece |
| 図 6 | Measurement method of micro-tensile bond strength |
| 図 7 | Mean μ -TBS to pulpal dentin wall with / without immediate dentin sealing and dynamic cyclic load stress |
| 図 8 | Differences in probability of failure against μ -TBS among four experimental conditions |
| 図 9 | Typical images of C+S- specimen |
| 図 10 | Typical images of C+S+ specimen |
| 図 11 | Typical images of C-S- specimen |
| 図 12 | Typical images of C-S+ specimen |
| 図 13 | Mean μ -TBS to pulpal dentin wall with / without application of bonding agent |
| 図 14 | Difference in probability of failure against μ -TBS among two experimental conditions |
| 図 15 | Typical images of C+S+B+ specimen |